干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于树轮宽度的太白山地区春季干湿变化重建

齐贵增[1,2]，白红英[1,2]，孟　清[1,2]，赵　婷[1,2]，郭少壮[1,2]
（1　西北大学城市与环境学院，陕西　西安　710127；
2　陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西　西安　710127）

摘　要：秦岭为我国气候分界线和南水北调中线重要水源地，太白山为其最高峰，了解太白山区域的过去干湿变化特征对气候变化机制研究和未来水资源持续利用具有重要意义。基于秦岭太白山地区太白红杉树木年轮资料及其附近的宝鸡、眉县气象站1959—2016年气象数据进行分析，重建了1852—2016年春季(3～5月)*SPEI*值，分析了近165 a太白山春季干湿变化特征及其与大尺度环流变化关系。结果表明：(1) 太白山地区太白红杉径向生长主要受春季气候限制；与春季*SPEI*值相关性最高，达到－0.72($P<0.01$)，重建方程方差解释量为51.8%(调整自由度后为51.0%)。(2) 重建结果表明，近165 a来，有29 a春季为湿润年份，有23 a春季为干旱年份，分别占比为17.58%和13.94%。极端干旱年份为1892年、1929年、1945年和2006年，极端湿润年份为1881年、1921年和1990年，其中1892年(－1.73)和1881年(1.53)分别为最干旱和最湿润的年份。(3) 重建结果得到了周边地区干湿变化重建结果和历史文献灾害记载的验证；太白山地区干湿变化可以准确表征大区域干湿变化且存在2.5 a、3.1 a、3.8 a和8.4 a周期变化。太白山地区*SPEI*与赤道东太平洋海面温度成负相关以及与赤道西太平洋海面温度呈正相关，其干湿变化可能与ENSO活动有关。

关 键 词：太白山；太白红杉；树木年轮；春季；*SPEI*
文章编号：1000－6060(2020)04－0955－12(0955～0966)

全球气候变化已经成为近些年研究的热点问题之一，气候变化对自然生态系统和人类生存环境产生了重大影响[1]。在气候研究中由于现代气象资料监测时间较短，不能揭示历史气候变化规律，所以在研究中通常采用代用资料对历史气候变化进行研究。相较于其他历史气候代用资料，树木年轮资料具有定年准确、分布广泛和易于获取等优点[2]，因此利用树木年轮获取历史气候变化资料以延长其时间序列，对于研究历史气候变化规律和预测未来气候变化趋势至关重要。

秦岭地区利用树木年轮资料对历史气候变化规律进行重建及树木生长对气候变化响应研究已取得一定成果。戴君虎等[3]利用太白落叶松树木年轮资料重建近300 a来太白山地区温暖指数；刘禹等[4]重建了过去 251 a镇安地区3～4月气温；秦进等[5]利用太白红杉树木年轮重建近144 a春季气温；侯丽等[6]通过改进PPR方法重建秦岭地区近200 a来2～4月气温；苏凯等[7]重建160 a太白山地区上年11月到当年6月降水量，且得出降水是抑制太白红杉径向生长的主要因素；CHEN 等[8]重建1482年以来华山4～7月降水量；CHEN 等[9]研究得出南五台地区油松早材宽度主要受春季和初夏气候变化影响，且重建了南五台地区4～6月的降水变化；邵雪梅等[10]利用秦岭东部地区华山树木年轮年表与气候变化之间的关系得出树木径向生长与对4～6月气温和降水变化关系密切；陈兰等[11]基于Vaganov-Shashkin模型揭示太白红杉生长季(4～8月)的温度，生长初期的降水量是限制秦岭地区太

收稿日期：2019－04－24；　**修订日期：**2020－06－06
基金项目：国家林业公益性行业科研专项(201304309)资助
作者简介：齐贵增(1994－)，男，学生，硕士，主要从事树木年轮与区域气候变化研究. E-mail：1553271382@qq.com
通迅作者：白红英. E-mail：hongyingbai@163.com

白红杉生长的主要气候因子。以上研究均表明秦岭地区树木径向生长与4月前后的气候变化密切相关,但其都是树木径向生长与气温或降水单一气候因子之间的关系。*SPEI*指数[12](Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)不仅耦合了降水和潜在蒸散发而且具备干旱多尺度特征,因此探究*SPEI*与树木径向的生长关系对揭示干湿变化对树木生长影响具有重要意义。

秦岭为我国重要的南北地理分界线与气候分界线,地形复杂海拔落差较大,成为对全球气候变化响应的敏感区和脆弱区。太白山为秦岭最高峰,受到人为影响较小,使其相对于其他地区更容易捕捉到气候变化的信号[13-15]。太白红杉是太白山林线区唯一可成纯林的树种[16],垂直分布于海拔2 850~3 500 m,是气候变化重建的理想树种之一,能够较好的反映气候变化[14,17]。本文利用太白红杉树木年轮资料重建1852—2016年的太白山地区春季*SPEI*变化,并利用现有的实测气象数据、历史灾害记录和周边地区气候重建数据进行对比和验证,以期揭示过去太白山地区干湿变化规律及其机制特征,为探讨秦岭地区未来水资源可持续利用和预测未来气候变化趋势提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况和资料采集

太白山为秦岭最高峰,位于秦岭中部(33°49′~34°10′ N,107°19~107°58′ E),海拔2 800~3 771.2 m,该地区年气温1.8~2.1 ℃,降雨量800~900 mm,属大陆性季风气候区[14]。太白山位于温带和北亚热带的过渡区,植被带垂直分布非常明显,太白红杉主要分布在海拔2 800~3 450 m,太白红杉以下接巴山冷杉群系[18]。采样区土壤发育良好,土壤层厚度为10~30 cm,立地坡度均在15°~45°范围内,树木为自然生长状态,人类对其影响较小[5]。本研究分别于2013年秋和2016年秋进行采样(107.8°N,34°E),平均海拔3 216 m,坡向主要为西坡,坡度为30°~35°,依据国际树轮数据库(ITRDB)的标准,共挑选45棵健康的太白红杉,平均树高为6.84 m,平均胸径为7.09 cm,在树高1.3 m处使用生长锥从平行坡面和垂直坡面方向取A、B两芯作为复本,共收集90个原始树芯样本。

1.2 数据资料

选取的气象数为采样点附近且监测时段连续、完整的宝鸡气象站(34°23′ N,107°09′ E,海拔612.4 m,资料时段为1959—2016年)和眉县气象站(34°17′ N,107°45′ E,海拔517.6 m,资料时段为1959—2016年)的月平均气温和月降水量(图2)。气象资料由陕西省气象局和中国气象数据网(http://data.cma.cn/)提供并对数据进行了一致性检验[19]。两气象站处于同一环流形势下,气团属性相同,波动变化状态一致,气温、降水分布基本一致[7],因此采用两地气象资料值,不仅能代表研究区域气候状况,而且能有效避免随机误差。

本文中使用的空间格网数据*SPEI*数据来自*SPEI* base version 2.5(http://digital.csic.es/handle/10261/153475)[12,20],时间为1959—2016年春季(3~5月,3个月尺度),空间分辨率为0.5°×0.5°。

海表面温度数据是由美国国家大气研究中心提供的分辨率为1°×1°的海面温度分析数据集HadISST3(https:// climatedataguide.ucar.edu/climate-data/

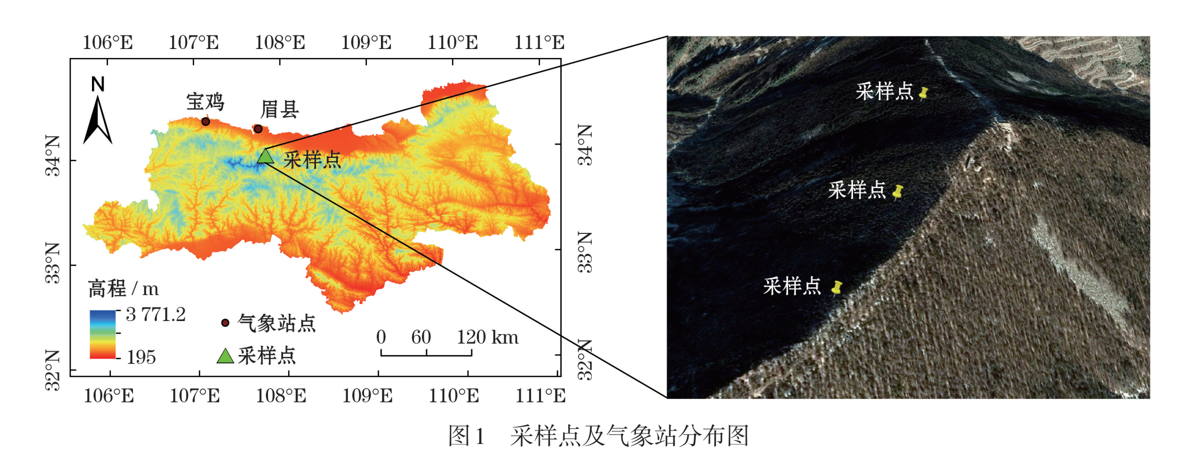


图1 采样点及气象站分布图

Fig. 1 Locations of tree ring sample site and meteorological stations

sst-data-noaa-extended-reconstruction-ssts-version-3-ersstv3-3b)，本文采用的数据范围是1959—2016年3～5月平均值。

秦岭华山降水重建和西秦岭降水距平值重建来源于美国国家海洋和大气管理局NOAA(https://www. ncdc. noaa. gov/ paleo-search /reports/ location?dataTypeId=3&reconKeywords=Precipitation&search=true)。

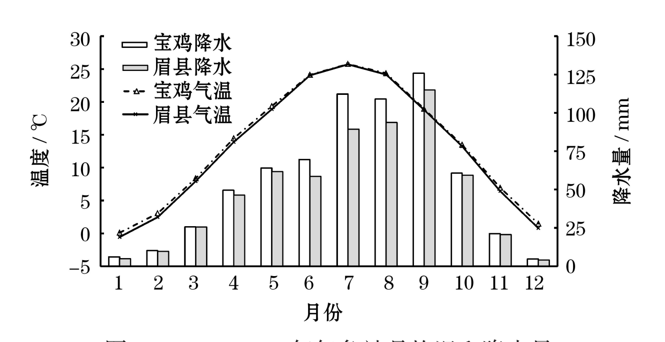


图2　1959—2016年气象站月均温和降水量

Fig. 2　Monthly mean temperature and precipitation of meteorological stations from 1959 to 2016

1.3　研究方法

(1) 本文基于Penman-Monteith(PM)公式计算标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *SPEI*)具体计算参考Beguería等人研究[21]。不同时间尺度的*SPEI*反映过去不同时间的干湿状况，因此本文采用1个月尺度*SPEI*反映月干湿状况，3个月尺度*SPEI*反映季度干湿状况，12个月尺度反映年度干湿变化。

(2) 树木年轮样品使用粘合剂安装在木框架中，经过干燥、磨砂和抛光后，之后对树木年轮进行初步定年工作。随后采用LINTAB轮宽仪(精度为0.01 mm)对树木年轮宽度进行测量，利用国际树木年轮库的COFECHA程序对树木年轮宽度序列和交叉定年准确性进行检验[22-23]，剔除了与主序列相关性差和奇异点较多的样本，保留68条树木年轮宽度序列，各个样本与主序列平均相关性为0.664。

(3) 年表建立过程中每个树轮宽度序列采用零信号标准化方法中的负指数曲线标准化[24-25]，消除了与树龄相关的生长趋势以及避免了树木立地条件和树间竞争造成的干扰，同时保留了可能与气候变化相关的信息[26-27]。采用零信号标准化方法生成的趋势曲线避免了测量序列中共有的生长模式和采用确定性曲线去趋势方法中趋势失真问题，并且保留了低到中频信息[24]，去趋势树木年轮序列使用双重稳健均值函数方法产生标准年表[26-27]，标准化过程在计算机程序RCSSigFree中进行，参考(http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software)。采用平均敏感度(Mean sensitivity, *MS*)、标准偏差(Standard deviation, *SD*)、样本总体代表性(Expressed population signal, *EPS*)、信噪比(Signal to noise ratio, *SNR*)和第一主成分所占方差量(Variance in first eigen vector, *PC*1)来评价太白红杉径向生长情况及其与气候变化敏感性关系[28-29]。

(4) 多带谱分析方法[30](The multi-taper method, MTM)对重建*SPEI*变化序列进行功率谱分析以揭示重建期间*SPEI*周期变化。

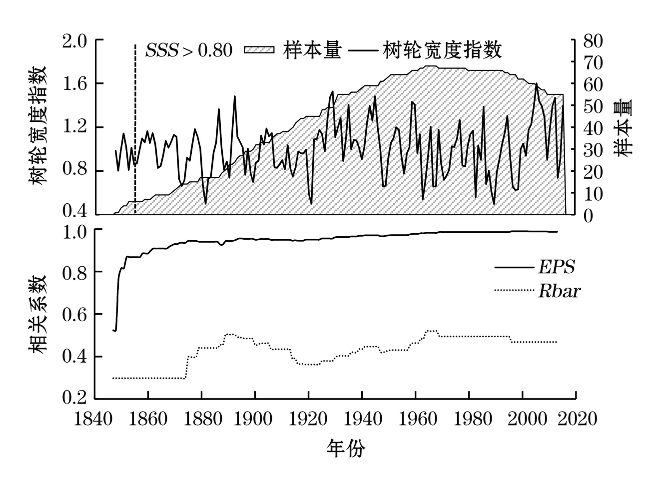
2　结果分析

2.1　树轮宽度年表建立

本研究采用零信号方法建立了太白红杉宽度年表，其中以子样本信号强度(Sub-sample signal strength, *SSS*)确定标准年表的可靠时段，取*SSS*门限为0.80[22]，结合样芯间相关系数(Running inter-series correlation, *Rbar*)确定年表可靠时段为1852—2016年(165 a)。标准年表的平均敏感度为0.19，标准偏差为0.218，样本总体代表性为0.977，信噪比为4.315，第一主成分所占方差量为52.40%。

2.2　树轮宽度年表与气候因子的相关分析

树轮宽度年表与气候要素的相关系数如图4，



注：*SSS*为子样本信号强度；*EPS*为样本总体代表性；*Rbar*为样芯间相关系数

图3　树木年轮宽度标准年表、样本量、*EPS*和*Rbar*

Fig. 3　Standard chronology of tree-ring width, sample size, *EPS* and *Rbar*

选取上一年9月至本年12月的月平均气温和月降水量与样本树轮宽度指数序列进行Pearson相关分析。相关分析表明，大多数月份的树木径向生长与气温呈正相关关系，特别是上一年11月和当年3月、4月、5月、6月达到0.05显著水平。树木径向生长与降水量在上一年1月、早春到夏初（2～6月）和秋末（9月、10月、11月）呈负相关，尤其在3月、4月和5月达到0.01显著水平，其余时段为正相关关系，但未达到显著水平。树木径向生长与当年的*SPEI*之间多存在负相关关系，特别是在3月、4月、5月均达到0.01显著水平。利用*SPEI*指数具有多时间尺度的优势，本文分析树木径向生长与*SPEI*季尺度（3个月尺度）的相关关系，其与夏季（6～8月）和秋季（9～11月）没有达到显著性水平，与春季（3～5月）和冬季（p12～c2）的*SPEI*值相关性达到0.01显著水平，与春季*SPEI*值相关性最高为-0.72（$p<0.01$，$n=57$）。

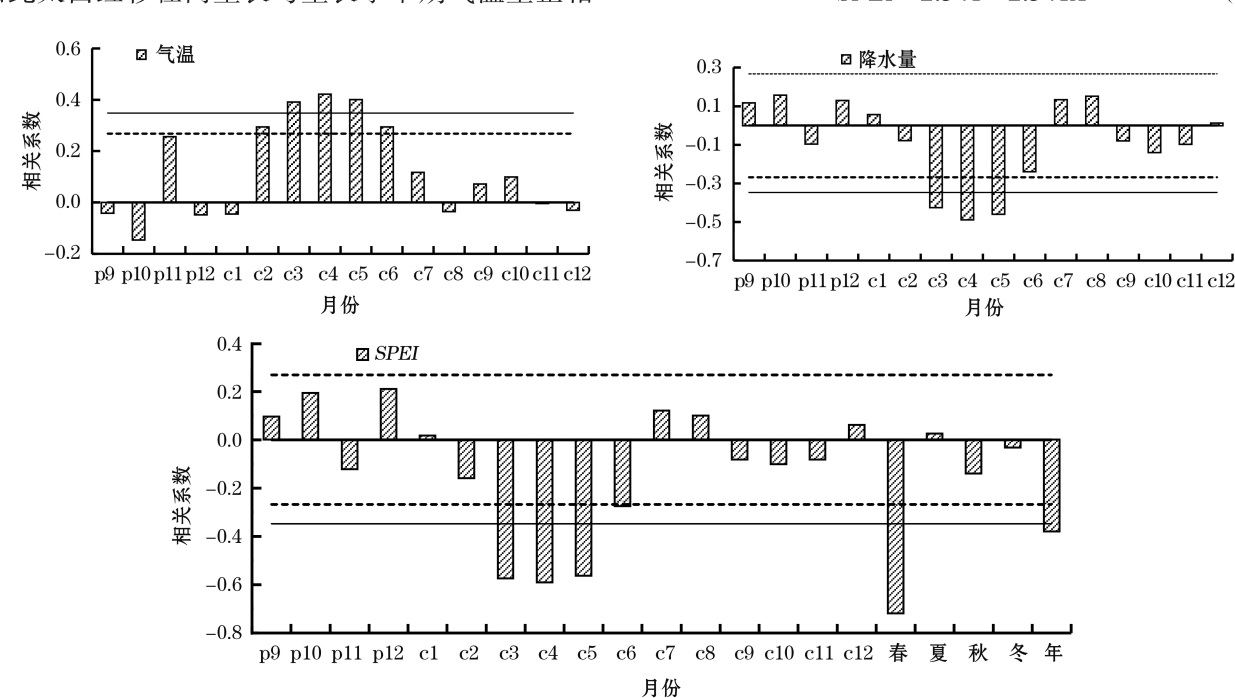
2.3 树木径向生长与气候关系的生理学解释

从相关分析研究得出春季*SPEI*在限制太白红杉径向生长方面发挥了重要的作用。春季温度升高有助于降低植物的睡眠水平，加快根系伸长和发芽速率，树木形成层细胞的分裂提前[31]，而气温升高往往促进蒸散发加快从而导致*SPEI*指数的下降，因此太白红杉径向生长与生长季早期气温呈正相关，与*SPEI*指数呈负相关。春季正值太白红杉生长季前期气温较低，过多的降水也会造成土壤温度下降，不利于高海拔地区冻土和积雪融化，同时低温环境会限制植物根部对土壤水分的吸收并且不利于植物中水分的运输，会抑制植物光合作用[7,32-33]，由于这种情况的发生，导致太白红杉径向生长与春季*SPEI*存在负相关关系，李俊生等[34]和苏凯等[7]研究表明生长期降水量增多会使得太白红杉的径向生长速率下降。此外，在春季前夜间温度相对升高，呼吸速率加快，而白天光合作用受到抑制导致净光合作用下降，减少作为储存的光合产物的积累可能导致太白红杉径向生长形成窄轮或树木生长受到抑制[33,35]。随着气温持续升高，树木的生理干旱状况缓解，树木的呼吸作用、蒸腾作用加强，气温和降水均达到树木生长所需的要求，树木生长达到最为理想状态，气候因素对其生长限制性较小，因此7～9月气温、降水量和*SPEI*与太白红杉径向生长相关系数极低且没达到显著。

2.4 春季*SPEI*重建及干湿变化特征分析

2.4.1 春季*SPEI*重建 根据以上分析，重建了春季（3～5月）*SPEI*，重建年份可追溯到1852年，*SPEI*和标准化树轮宽度指数序列之间的转换方程，如下：

$$SPEI = 2.541 - 2.541X \quad (1)$$



注：虚线为95%置信水平，实线为99%置信水平。p9～p12表示上一年9～12月，c1～c12表示本年1～12月

图4 树轮宽度指数与各月气候要素之间的相关关系

Fig. 4 Correlation coefficients between tree-ring width index and monthly climate factors

表1 转换方程检验的统计量

Tab. 1 Calibration and verification statistics

方差解释量	方差解释量调整值	符号检验	一阶差符号检验	乘积平均数*t*	方差检验值*F*	误差缩减值*Re*	*DW*
51.8%	51.0%	40(34*,36**)	39(34*,36**)	6.09	59.19	0.49	1.59

注:* 代表95%的置信水平,** 代表99%的置信水平

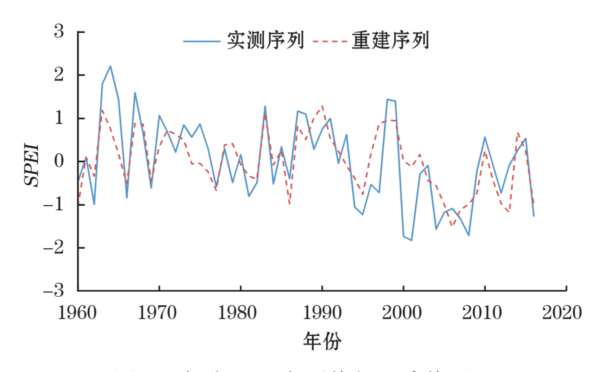


图5 春季*SPEI*实测值与重建值对比

Fig. 5 Comparison between the actual and reconstructed *SPEI* of spring

式中:*SPEI*为春季(3～5月,3个月尺度)*SPEI*值;*X*为标准化树轮宽度指数序列。

该方程对观测时段(1960—2016年)的方差解释量为51.8%,调整后为51.0%,*F*检验值为59.19,达到了0.001的显著水平。采用逐一剔除法[36]对转换方程的稳定性进行检验,检验的各统计量列于表1。重建序列与观测序列的误差缩减值、乘积数平均数、符号检验、一阶差符号检验和*DW*统计检验(Durbin-Watson)等均体现了回归模型的可靠性。

2.4.2 重建*SPEI*序列特征分析

图6为1852年以来秦岭太白山地区春季*SPEI*值,且对重建序列进行11 a滑动平均以揭示*SPEI*低频变化特征。可以得出,1852—2016年间春季*SPEI*平均值为－0.012,重建*SPEI*的标准偏差(σ)为0.61,定义*SPEI*=－0.012±σ为正常状态范围,超过正常范围的表示干旱(*SPEI*＜－0.012－σ)和湿润(*SPEI*＞－0.012+σ),超出外部水平线的表示极度干旱(*SPEI*<－0.012－2σ)和极度湿润(*SPEI*＞－0.012+2σ)。根据重建1852—2016年春季*SPEI*值,自1852年以来,有29 a为湿润年份,占总数的17.58%,有23 a为干旱年份,占总数的13.94%(表2)。近165 a,发生了3次极端湿润事件和4次极端干旱事件,极端湿润年份为1881年、1921年和1990年,极端干旱年份为1892年、1929年、1945年和2006年,其中1881年(1.53)和1892年(－1.73)分别为最湿润和最干旱的年份。连续3 a及以上的*SPEI*值均高于重建期平均*SPEI*值的时段有:1854—1856年、1863—1865年、1871—1875年、1879—1884年、1888—1890年、1896—1901年、1907—1911年、1913—1921年、1947—1950年、1955—1957年、1963—1965年、1970—1973年、1987—1992年和1996—2000年;连续3 a及以上的*SPEI*值均低于重建期平均*SPEI*值的时段有:1857—1862年、1866—1870年、1876—1878年、1885—1887年、1891—1895

表2 近165 a来湿润、干旱年份及其重建值

Tab. 2 Wet and dry years in reconstructed March-May *SPEI* in recent 165 years

湿润年份	*SPEI*重建值	干旱年份	*SPEI*重建值
1871	0.69	1886	－0.92
1872	0.86	1892	－1.73
1873	0.73	1927	－0.66
1880	0.84	1928	－1.19
1881	1.53	1929	－1.34
1882	0.70	1932	－0.72
1883	0.66	1935	－1.03
1890	0.67	1943	－1.00
1896	0.60	1944	－0.66
1899	0.77	1945	－1.23
1914	0.64	1959	－1.09
1920	1.04	1960	－1.03
1921	1.28	1977	－0.67
1948	0.88	1986	－0.98
1949	0.86	1995	－0.77
1963	1.18	2005	－1.00
1964	0.76	2006	－1.53
1967	0.88	2007	－1.12
1968	0.86	2008	－1.00
1971	0.72	2009	－0.74
1972	0.63	2012	－0.98
1983	1.12	2013	－1.19
1987	0.82	2016	－1.01
1989	1.00	–	–
1990	1.28	–	–
1997	0.87	–	–
1998	0.95	–	–
1999	0.95	–	–
2014	0.67	–	–

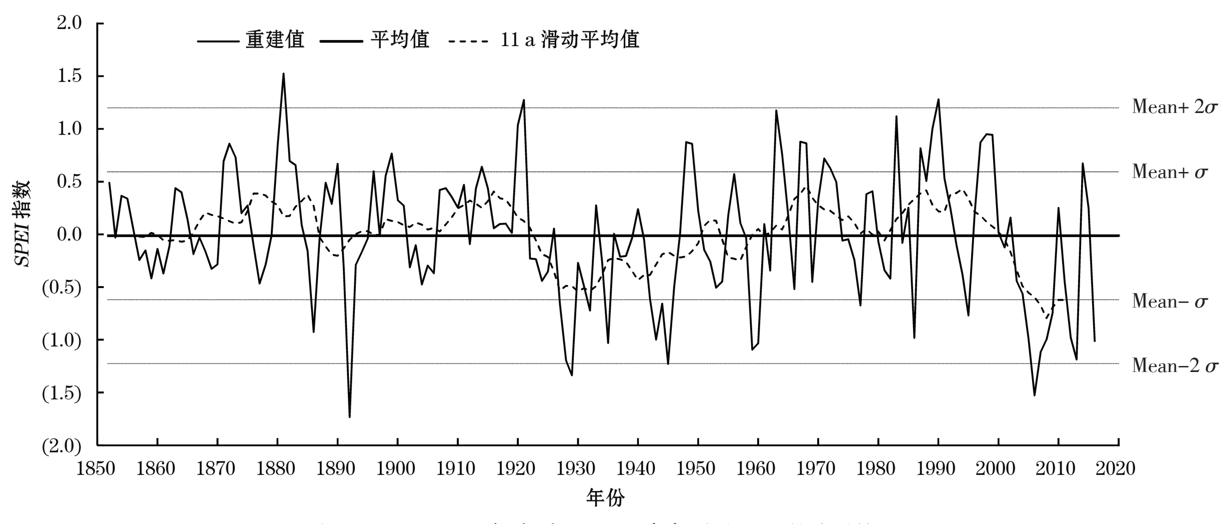


图6　1852—2016年春季*SPEI*重建序列及11 a滑动平均

Fig. 6　Reconstructed *SPEI* of spring from 1852 to 2016 and the 11 a moving average

年、1902—1906年、1922—1925年、1927—1932年、1937—1939年、1941—1946年、1951—1954年、1958—1960年、1974—1977年、1980—1983年、1993—1995年、2003—2009年、2011—2016年。

为了获得重建春季*SPEI*低频变化特征，本文中采用11 a滑动处理，以便更好的反映其年代际变化，并且依据前人经验[5,37]，本文定义滑动值连续11 a以上低于重建时段春季*SPEI*平均值的时间段为干旱期，滑动值连续11 a以上高于重建时段春季*SPEI*平均值的时间段为湿润期（图6）。湿润期（*SPEI*>−0.012）主要为1861—1881年、1888—1917年、1954—1975年和1977—1995年；干旱期（*SPEI*<−0.012）主要为1918—1945年和1996—2016年。

图7a和图7b分别为实测春季*SPEI*、重建春季*SPEI*与0.5°×0.5°春季*SPEI*数据集（1960—2016年3～5月，3个月尺度*SPEI*）空间相关分布图，用以评估重建气候序列的在区域上的意义。结果表明，在秦岭中部地区，特别是在陕西地区相关性最高，*SPEI*的重建可以表明大范围的区域干湿变化，重建春季*SPEI*是具有区域干湿变化的代表性，同时也证

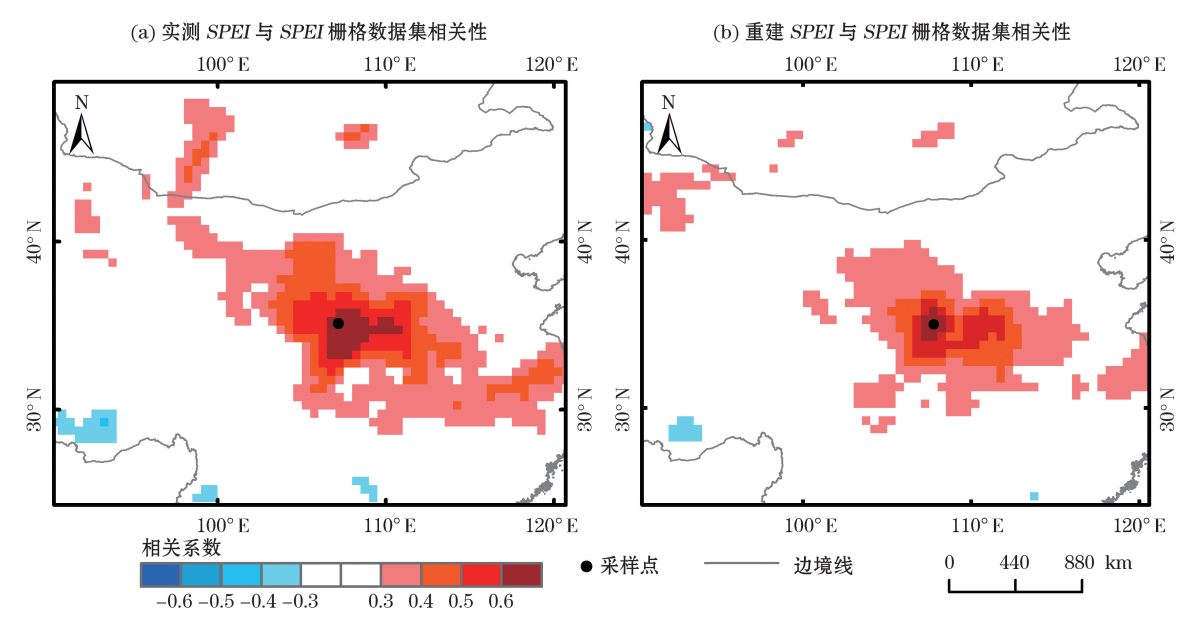


图7　1960—2016年实测和重建春季*SPEI*与同期网格化*SPEI*数据集（3～5月，3个月尺度）空间相关性

Fig. 7　Spatial correlation of the observed (a) and reconstructed *SPEI* of spring (b) with the regional gridded March-May *SPEI* for the period 1960–2016

明了重建结果准确可靠。

2.5　基于历史资料的对比验证

重建结果中所显示的干、湿年份与陕西近200 a所发生的气象灾害历史记载都有较好的验证(气象灾害历史记录来源于陕西地情资料库(http://www.sxsdq.cn),比较典型年份例如1877年“自去冬今春及夏不雨,赤地千里,人相食,道殣相望,为百年之奇灾”;1886年“秋禾约收六分”;1892年“入春后,陕西雨泽愆期”;1928年“自春徂秋,陕西大旱,滴雨未沾”;1929年“春夏之交,雨泽愆期,二麦无收成”1945年“3~5月,全省未有好雨,吐穗、扬花时又遇旱风,麦歉收”;1959年“陕北春旱,关中、陕南夏秋连旱”。1871年“阴雨连绵,河水暴涨。1872年“六月,甘泉县大水”;1873年“怀远县无定河大水,沿川冲没牲畜禾稼无算”;1881年3~5月均记载“雨雹伤禾,水涨甚猛,冲没田庐。山水陡涨,冲没居民草房。灞河水涨,沿河棉花、秋禾被淹”;1921年“6月陕西大水,安康,旬阳等地汉江大洪水,汉阴城西南一片汪洋。夏,周至、户县、眉县、陇县、渭南、长安等县河水暴涨,淹没秋田。秋,关中,陕南秋雨连绵,河水泛涨,冲淹秋田、房屋。本年水灾奇重,计53县受灾。灾情之重为数十年所未有”等等。这些灾害历史记录与本文重建结果相互吻合,表明重建结果准确性较高。与此同时灾害事件对人们生产生活产生和社会稳定具有巨大影响,本文重建结果对了解太白山乃至陕西地区长时间灾害发生频率和强度及减少灾害损失具有重要意义。

2.6　周期分析

本文采用多带谱分析方法MTM[30]对重建太白山地区*SPEI*变化序列进行周期分析,由图8可知,近165 a太白山地区春季*SPEI*变化序列存在2.5 a、3.1 a、3.8 a和8.4 a周期变化规律。2~9 a振荡周期可能厄尔尼诺－南方涛动现象(El Niño-Southern Oscillation,ENSO)有关,其中2~4 a周期与北极涛动和北大西洋涛动的两年振荡周期一致可能与对流层准两年振荡有关[38],在兴隆山、崆峒山和汾河流域等北方地区也发现同样的干旱变化周期[39-41]。

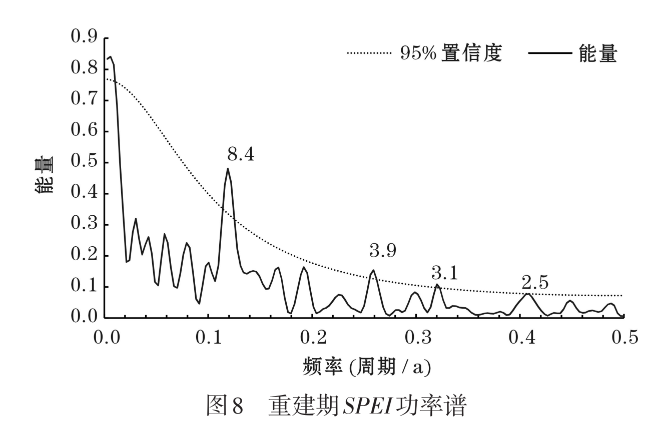


图8　重建期*SPEI*功率谱

Fig. 8　Reconstruction period *SPEI* power spectrum

3　讨 论

重建春季*SPEI*指数表明20世纪20~40年代中期所记录的春季干旱期持续时间最长与华山降水重建[8]所记录1918—1932年基本对应,在天山[42]和喜马拉雅西部Uttarkashi地区[33]*SPEI*重建、汾河流域*PDSI*重建[41]和黄土高原*PDSI*重建[43]都得到验证。秦岭地区气温重建表明20世纪20~30年代末是一个显著的暖期[5],在其他地区也出现同样事件,在我国北方根据多个指数表明20世纪20~30年代出现的干旱事件与同时期都相对应一个温暖的时期[44-46],以上研究表明高温可能导致严重的干旱事件发生。21世纪开始的干旱期在秦岭地区基于实测资料分析得到验证[47],证明重建结果的准确,而且在华山降水重建[8]也表明1991—2012年经历了干旱时期。

在19世纪70年代的湿润期在华山地区[8]表现为1864—1876年,与本文结果有微小差异,可能与树木年轮资料采集地点和树木种类不同有关。20世纪初~20世纪20年代初的湿润期在华山降水重建[8]和太白山地区降水重建[7]中已经得到确认,在20世纪初~20世纪20年代初为一显著冷期[5,48],可能气温对干湿变化具有很重要的影响。在20世纪60年代发生的湿润期,在崆峒山地区*PDSI*重建中表明1963—1969年为显著的湿润期[39],同时在中国西北地区[46]、山西汾河流域和蒙古东北部也得到验证[41,49],可能与东南亚夏季风强度和南海夏季风强度有关[39,50]。20世纪80年代年的湿润期在秦岭地区降水实测资料研究[51]中得到验证且在华山地区[8]降水重建中也得到验证。

图9分别为西安地区旱涝指数[52](做相反数处理)、秦岭华山降水重建[45](来源于NOAA)、西秦岭降水距平值重建[53](来源于NOAA)与本研究结果对比分析。为了满足对比分析条件,选取了1852年之后的重建时段。四条序列均进行11 a滑动处理,以

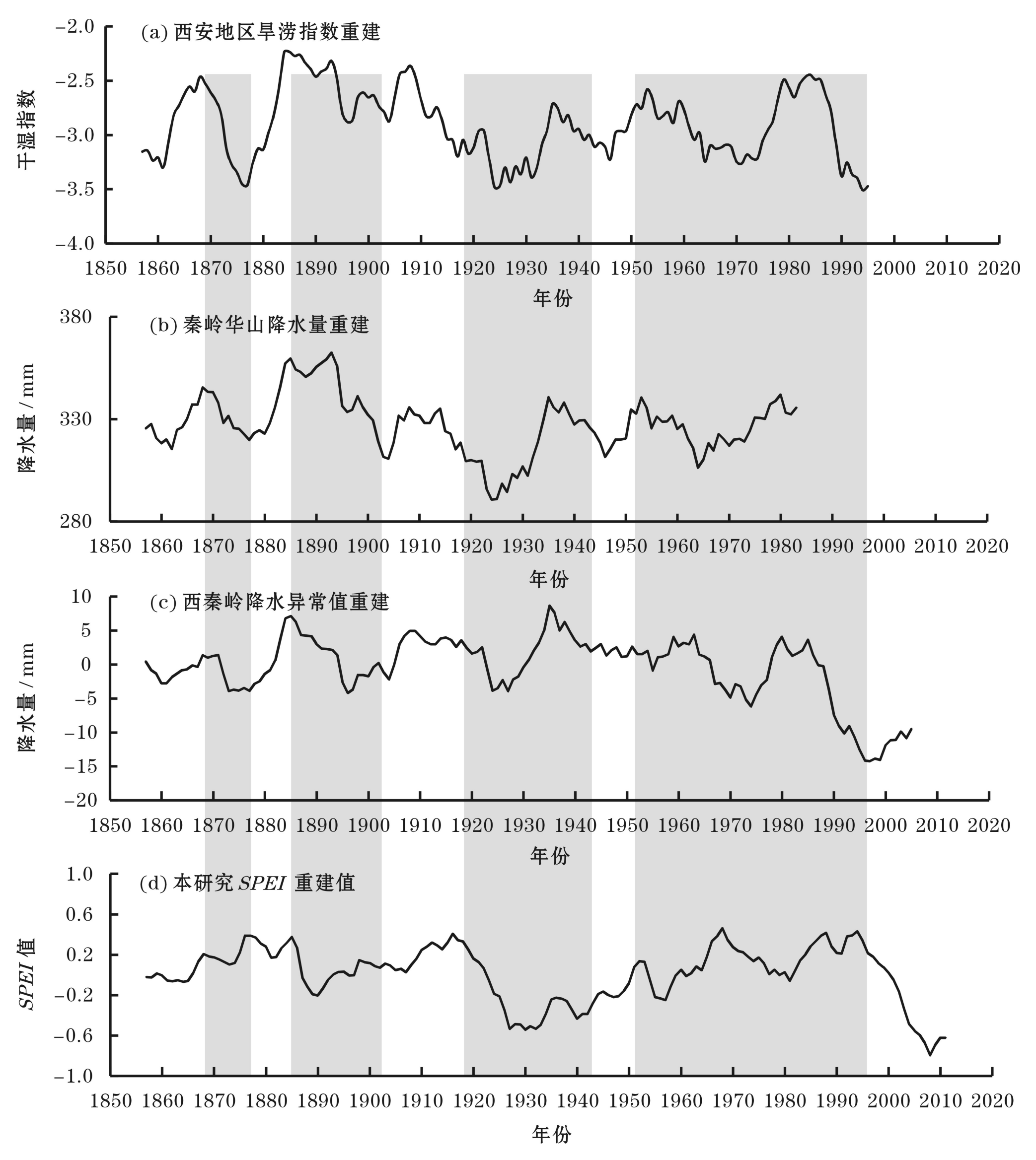


图9 本文重建序列与其他地区序列对比

Fig. 9 Comparison between study area and other sites of reconstructed sequence

突出显示低频干旱信息。由图9可知，在重建的共同时间段内，干湿事件发生时间基本一致，较典型为1881年前后的湿润年份，1929年前后的干旱年。四条序列在低频变化中大多数时段均表现出变化同步性趋势，19世纪60年代末到70年代初干湿变化；19世纪80～90年代的干湿变化；20世纪20～30年代的干旱期和30～40年代的干旱缓解的过程；以及20世纪50～80年代干湿变化特征，这些变化都在不同地区重建序列中具有较好的变化一致性，同时也验证了本文重建结果具有较好的可靠性。然而，其中也存在干湿变化不吻合的时间段，如19世纪70年代以及20世纪30年代末40年代初，这种干湿变化的不同可能是由于采样点不同，重建地区的气候模式有所差异和人为因素导致，但典型时段干湿变化吻合度较高。

图10a和图10b为分别为实测、重建春季*SPEI*与*SST*相关系数空间分布，由图可知海气相互作用对秦岭地区干湿变化具有一定的影响，*SPEI*与赤道东太平洋海水表面温度的负相关性及与西太平洋海温的正相关表明，太白山气候可能与ENSO有关。尤其与赤道东太平洋海面温度负相关系数最高，表明这些区域是我们研究区域的主要水分来源区，秦岭地区春季干旱变化受赤道东太平洋海温变化影响剧烈。这与黄土高原地区树木年轮重建*PDSI*[43]与*SST*相关模式基本一致，有研究表明提出了中国北方降水与赤道太平洋东部海温的负相关，

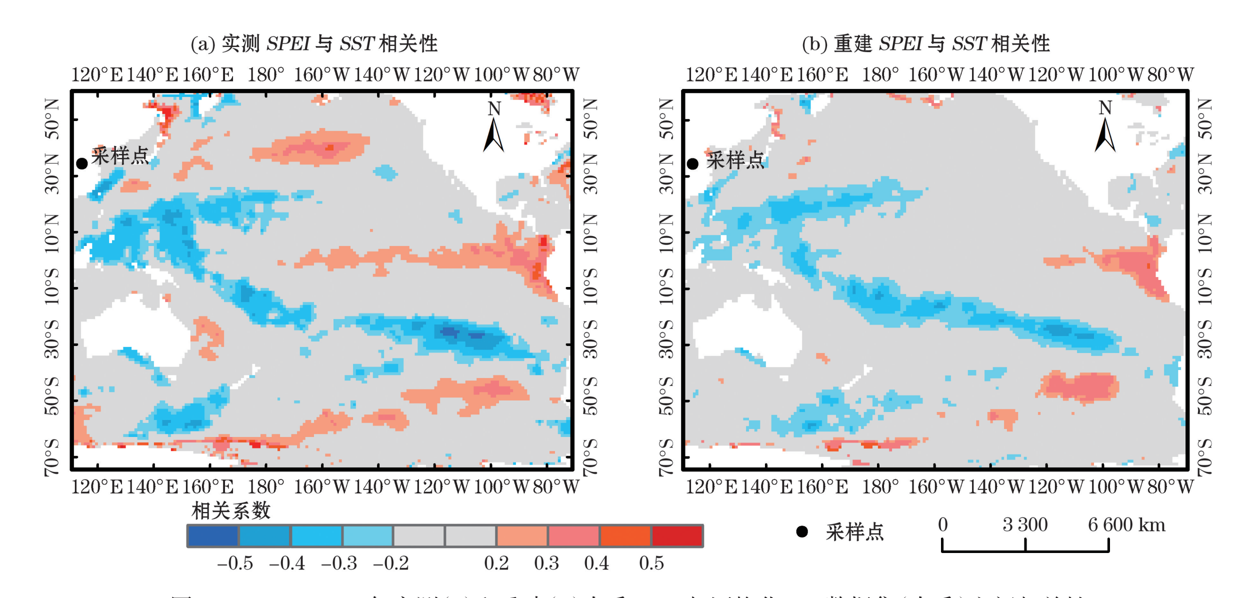


图 10 1960—2016 年实测(a)和重建(b)春季 *SPEI* 与网格化 *SST* 数据集(春季)空间相关性

Fig. 10 Spatial correlation of the observed (a) and reconstructed (b) *SPEI* of spring with the regional gridded *SST* (spring) for the period 1960–2016

ENSO 与亚洲季风变化密切相关,并对中国大部分地区降水产生影响[54-55],且当 ENSO 处于较寒冷阶段时,赤道西太平洋海面温度较高加强了 Walker 和 Hadley 环流,其下行分支迫使亚热带高压北移,我国北方呈现湿润气候[41,56-57],*SPEI* 重建中 2～9 a 的周期变化也进一步证明这种关系。

为进一步探讨太白山地区干湿变化与大尺度环流的关系,本研究对重建春季 *SPEI* 进行 11 a 滑动平均处理后与太平洋十年涛动指数(PDO)(http://research.jisao.washington.edu/pdo/)之间及进行相关分析,发现二者存在显著负相关关系($r = -0.40, n = 117$),表明研究区的干湿变化与 PDO 密切相关。已有研究得出 PDO 暖相位阶段与中国北方 100°E 以东对应为干旱阶段,负位相阶段则对应为湿润时段[58],研究区干湿变化与 PDO 指数也存在同样关系。

4 结 论

太白红杉树木年轮宽度年表(1852—2016 年)具有较高的可靠性,对春季 *SPEI* 变化敏感度较高。近 165 a 春季 *SPEI* 重建结果通过检验,证明重建结果可靠,重建结果显示,1852—2016 年间共有 27 a 为湿润年份,23 a 为干旱年份,发生了 3 次极端湿润事件和 4 次极端干旱事件,其中 1892 年(−1.73)和 1881 年(1.53)分别为最干旱和最湿润的年份。重建的太白山地区干湿变化具有区域代表性,近 165 a 太白山地区春季 *SPEI* 变化序列存在 2.5 a、3.1 a、3.8 a 和 8.4 a 周期变化规律,重建 *SPEI* 与 PDO 指数呈显著负相关关系,与赤道东太平洋海面温度成负相关以及与赤道西太平洋海面温度呈正相关,暖 ENSO 事件可能导致研究区的春季干旱的发生,冷 ENSO 事件可能导致春季湿润的发生。

在未来研究中希望能扩大采样范围,尽可能收集大范围树木年轮数据,如能与其他气候纪录代用资源相结合,如花粉、湖泊沉积物和黄土剖面古土壤等,这样不仅能够更加全面细致的了解气候变化对树木生长的影响和过去气候变化特征,而且能够提高对于陕西乃至中国气候变化特征和气候变化机制的认知。在本研究中确定了太白山地区干湿变化与大规模大气环流有关,在以后研究中要重点从大气环流对太白山地区气候影响机理和具体影响的量化上进行深入探讨,这样能够更加精确制定未来太白山地区水资源利用和生态保护措施,为秦岭生态文明建设提供更精确的参考数据。

参考文献(References)

[1] ELIZBARASHVILI M, ELIZBARASHVILI E, TATISHVILI M, et al. Georgian climate change under global warming conditions[J]. Annals of Agrarian Science, 2017, 15(1): 17-25.

[2] JAN E, EDWARD R C, FRITZ H S. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature

variability[J]. Science,2002,295(5563):2250 – 2253.
[3] 戴君虎,邵雪梅,崔海亭,等. 太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建[J]. 第四纪研究,2003,23(4):87 – 94. [DAI Junhu,SHAO Xuemei,CUI Haiting,et al. Reconstruction of past eco-climate by tree-ring width index of *Larix chinensis* on MT Taibai[J]. Quaternary Sciences,2003,23(4):87 – 94.]
[4] 刘禹,马利民,蔡秋芳,等. 依据陕西秦岭镇安树木年轮重建3~4月份气温序列[J]. 自然科学进展,2001,11(2):157 – 162. [LIU Yu, MA Limin, CAI Qiufang, et al. Reconstruction of March to April temperature using tree ring data of Qinling Mountains, Shaanxi Province[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(2):157 – 162.]
[5] 秦进,白红英,刘荣娟,等. 近144年来秦岭太白山林线区3~6月平均气温的重建[J]. 生态学报,2017,37(22):7585 – 7594. [QIN Jin,BAI Hongying,LIU Rongjuan,et al. Reconstruction of March-June mean air temperature along the timberline of Mount Taibai, Qinling Mountains, northwest China, over the last 144 years[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(22):7585 – 7594.]
[6] 侯丽,李书恒,陈兰,等. 近200年来秦岭2~4月历史气温重建与空间差异[J]. 地理研究,2017,36(8):1428 – 1442. [HOU Li,LI Shuheng,CHEN Lan,et al. Reconstruction of the historical temperature from February to April of the Qinling Mountains in recent 200 years[J]. Geographical Research, 2017, 36(8): 1428 – 1442.]
[7] 苏凯,白红英,张扬,等. 基于树轮 – 气候资料的160多年来秦岭太白山降水变化特征重建[J]. 生态学杂志,2018,37(5): 1467 – 1475. [SU Kai,BAI Hongying,ZHANG Yang,et al. Reconstruction of precipitation history in Taibai Mountain of Qinling Mountains based on tree-ring width and meteorological data in recent 160 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37 (5):1467 – 1475.]
[8] CHEN F,ZHANG R,WANG H,et al. Updated precipitation reconstruction (AD 1482 – 2012) for Huashan,north-central China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2016,123(3 – 4): 723 – 732.
[9] CHEN F, YUAN Y, WEI W, et al. April-June precipitation reconstruction for Xi'an and drought assessment for the Guanzhong Plain from tree rings of Chinese pine[J]. Journal of Water and Climate Change,2015,6(3):638 – 646.
[10] 邵雪梅,吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报,1994, 49 (2) : 174 – 181. [SHAO Xuemei, WU Xiangding. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* franch from Huashan, China[J]. Acta Geographica Sinica,1994,49(2):174 – 181.]
[11] 陈兰,李书恒,侯丽,等. 基于Vaganov-Shashkin模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应[J]. 应用生态学报,2017,28 (8):2470 – 2480. [CHEN Lan,LI Shuheng,HOU Li,et al. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(8):2470 – 2480.]
[12] VICENTE-SERRANO S M,BEGUERIA S,LOPEZMORENO J I,et al. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate,2010,23(7):1696 – 1718.
[13] 白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应[M]. 北京:科学出版社,2014. [BAI Hongying. The response of forest vegetation to environment changes in Qinba Mountains[M]. Beijing: Science Press,2014.]
[14] 秦进,白红英,李书恒,等. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异[J]. 生态学报,2016,36(17):5333 – 5342. [QIN Jin, BAI Hongying, LI Shuheng, et al. Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(17):5333 – 5342.]
[15] LIU H,TANG Z,DAI J,et al. Larch timberline and its development in north China[J]. Mountain Research and Development, 2002,22(4):359 – 367.
[16] 张文辉,王延平,康永祥,等. 太白红杉种群结构与环境的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 41 – 47. [ZHANG Wenhui, WANG Yanping,KANG Yongxiang,et al. Study on the relationship between *Larix chinensis* population's structure and environment factors[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(1):41 – 47.]
[17] 杨文峰,李兆元,吴素良,等. 秦岭太白山树木年轮对气候变化的响应分析[J]. 陕西气象,1993,(5):11 – 13. [YANG Wenfeng, LI Zhaoyuan, WU Suliang, et al. Response of tree-ring width to climate change in Mount Taibai of Qinling Mountains [J]. Shaanxi Meteorology,1993,(5):11 – 13.]
[18] 任毅,刘明时,田联会,等. 太白山自然保护区生物多样性研究与管理[M]. 北京:中国林业出版社,2006. [REN Yi, LIU Mingshi, TIAN Lianhui, et al. Biodiversity, conservation and management of Taibai Mountain National Nature Reserve[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2006.]
[19] FRITTS H C. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: A diagnostic analysis[J]. University of Arizona Press,1991,16(3):245 – 8.
[20] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZMORENO J I,et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901 – 2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index[J]. Journal of Hydrometeorology,2010,11(4):1033 – 1043.
[21] BEGUERIA S,VICENTE-SERRANO S M,ANGULO-MARTINEZ M. A multiscalar global drought dataset: The SPEI base: A new gridded product for the analysis of drought variability and impacts[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010,91(10):1351 – 1356.
[22] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43(1): 69 – 78.
[23] GRISSINO-MAYER H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA[J]. Tree-Ring Research,2001,57:205 – 221.
[24] MELVIN T M,BRIFA K R. A "signal-free" approach to dendroclimatic standardisation[J]. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 71 – 86.
[25] BRIFFA K R, MELVIN T M. A closer look at regional curve standardization of tree-ring records: Justification of the need, a

warning of some pitfalls, and suggested improvements in its application[C]. //HUGHES M K, SWETNAM T W, DIAZ H F, Dendro climatology. Dordreche: Springer, 2011: 113-145.

[26] COOK E R. A time series analysis approach to tree-ring standardization (dendrochronology, forestry, dendroclimatology, autoregressive process) [D]. Tucson: The University of Arizona, 1985.

[27] COOK E R, ALARCON A, HERRERA M E, et al. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences [J]. Arctic and Alpine Research, 1990, 23(1): 120.

[28] STORCH H V, NAVARRA A. Analysis of climate variability [M]. Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 1995.

[29] GAIRE N P, DHAKAL Y R, SHAH S K, et al. Drought (scPDSI) reconstruction of trans-Himalayan region of central Himalaya using *Pinus wallichiana* tree-rings[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 514: 251 – 264.

[30] MANN M E, LEES J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change, 1996, 33(3): 409 – 445.

[31] SEUNGJICK Y, WRIGHT B D. Persistence of growth variation in tree-ring chronologies[J]. Forest Science, 2000, 46(4): 507 – 520.

[32] 秦进,白红英,周旗,等. 牛背梁自然保护区林线不同海拔巴山冷杉径向生长对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 147 – 155. [QIN Jin, BAI Hongying, ZHOU Qi, et al. Radial growth response of *Abies fargesii* to climate change from different elevations at timberline of Niubeiliang Natural Reserve[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 147 – 155.]

[33] SHEKHHAR M, PAL A K, BHATTACHARYYA A, et al. Tree-ring based reconstruction of winter drought since 1767 CE from Uttarkashi, western Himalaya[J]. Quaternary International, 2018, 479: 58 – 69.

[34] 李俊生,胡理乐,舒俭民,等. 秦岭林线树种太白红杉生态特征及其对气候变化的响应[M]. 北京:科学出版社, 2012. [LI Junsheng, HU Lile, SHU Jianmin, et al. Ecological characteristics of *Pinus taiwanensis* in the forest line of Qinling Mountains and its response to climate change[M]. Beijing: Science Press, 2012.]

[35] FRITTS H C. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976.

[36] OSBORN J F, MOSTELLER F, TUKEY J W. Data analysis and regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1977, 141(4): 549.

[37] 蔡秋芳,刘禹,包光,等. 树轮记录的吕梁山地区公元1836年以来5~7月平均气温变化[J]. 科学通报, 2010, 55(20): 2033 – 2039. [CAI Qiufang, LIU Yu, BAO Guang, et al. Tree-ring-based May-July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836[J]. Chinese Science Bull, 2010, 55(20): 2033 – 2039.]

[38] 胡跃文,杨小怡. 北极涛动与北大西洋涛动的低频变化特征[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 316 – 322. [HU Yuewen, YANG Xiaoyi. Low-frequency variability of AO and NAO[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(3): 316 – 322.]

[39] FANG K Y, GOU X H, CHEN F H, et al. Tree-ring based reconstruction of drought variability (1615 – 2009) in the Kongtong Mountain area, northern China[J]. Global and Planetary Change, 2012, 80(1): 190 – 197.

[40] FANG K Y, GOU X H, CHEN F H, et al. Drought variations in the eastern part of northwest China over the past two centuries: Evidence from tree rings[J]. Climate Research, 2009, 38(2): 129 – 135.

[41] LI Y J, WANG S Y, NIU J J, et al. Tree-ring-based reconstruction of drought variability (1792 – 2011) in the middle reaches of the Fen River, north China[J]. Dendrochronologia, 2016, 40: 1 – 11.

[42] CHEN F, SHANG H M, YUAN Y J. Dry / wet variations in the eastern Tien Shan (China) since AD 1725 based on Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) tree rings[J]. Dendrochronologia, 2016, 40: 110 – 116.

[43] CHEN F, YUAN Y J, ZHANG R B, et al. A tree-ring based drought reconstruction (AD 1760 – 2010) for the Loess Plateau and its possible driving mechanisms[J]. Global and Planetary Change, 2014, 122: 82 – 88.

[44] YANG B, BRAEUNING A, JOHNSON K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(9): 38 – 1 – 38 – 4.

[45] HUGHES M K, WU X D, SHAO X M, et al. A preliminary reconstruction of rainfall in North-Central China since AD 1600 from tree-ring density and width[J]. Quaternary Research, 1994, 42(1): 88 – 99.

[46] FANG K Y, GOU X H, CHEN F H, et al. Precipitation variability during the past 400 years in the Xiaolong Mountain (central China) inferred from tree rings[J]. Climate Dynamics, 2012, 39(7 – 8): 1697 – 1707.

[47] 高涛涛,殷淑燕,王水霞. 基于*SPEI*指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 761 – 770.[GAO Taotao, YIN Shuyan, WANG Shuixia. Spatial and temporal variations of drought in northern and southern regions of Qinling Mountains based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 761 – 770.]

[48] LIANG E Y, LIU X H, YUAN Y J, et al. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China[J]. Climatic Change, 2006, 79(3 – 4): 403 – 432.

[49] PEDERSON N, JACOBY G C, D'ARRIGO R D, et al. Hydrometeorological reconstructions for northeastern Mongolia derived from tree rings: 1651 – 1995[J]. Journal of Climate, 2001, 14(5): 872 – 881.

[50] LI J, ZENG Q. A unified monsoon index[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(8): 115 – 1 – 115 – 4.

[51] 宋佃星,延军平,马莉. 近50 a来秦岭南北气候分异研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 492 – 498. [SONG Tianxing, YAN Junping, MA Li. Study on climatic differentiation in the south and north Qinling Mountains in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 492 – 498.]

[52] 白志虎,董安祥,郑广芬. 中国西北地区近五百年旱涝分布图

集:1470~2008[M]. 北京:中国气象出版社,2010.[BAI zhihu, DONG Anxiang, ZHENG Guangfen, et al. Atlas of the drought/flood category for nearly 500 years in northwestern China[M]. Beijing:China Meteorological Press,2010.]
[53] YANG F, WANG N, SHI F, et al. The spatial distribution of precipitation over the west Qinling region, China, AD 1470 - 2000[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2016, 443:278 - 285.
[54] 陆日宇. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温[J]. 科学通报,2005,50(11):1131 - 1135.[LU Riyu. Interannual variation of north China rainfall in rainy season and SSTs in the equatorial eastern Pacific[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(11):1131 - 1135.]
[55] 朱艳峰,陈隆勋. 亚澳季风异常与ENSO准四年变化的联系分析[J]. 大气科学进展,2002,19(4):727 - 740.[ZHU Yanfeng, CHEN Longxun. The relationship between the Asian/Australian Monsoon and ENSO on a quasi-four-year scale[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2002,19(4):727 - 739.]
[56] 龚道溢,王绍武. 近百年ENSO对全球陆地及中国降水的影响[J]. 科学通报,1999,44(3):315-320.[GONG Daoyi, WANG Shaowu. Impacts of ENSO on rainfall of global land and China[J]. Chinese Science Bulletin,1999,44(3):315 - 320.]
[57] YANG F L, LAU K M. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures[J]. International Journal of Climatology,2004,24(24):1625 - 1644.
[58] 马柱国,邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. 大气科学,2006,30(3):464 - 474.[MA Zhuguo, SHAO LiJuan. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006,30(3):464 - 474.]

Reconstruction of spring dry and wet changes in Taibai Mountain area based on tree ring width

QI Gui-zeng[1,2], BAI Hong-ying[1,2], MENG Qing[1,2], ZHAO Ting[1,2], GUO Shao-zhuang[1,2]
(1 *College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an* 710127, *Shaanxi, China*;
2 *Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an* 710127, *Shaanxi, China*)

Abstract: Qinling Mountains is considered the climatic boundary of China. It contains an important water source of the middle region of the south-to-north water diversion. Taibai Mountain is the highest peak in the region. Understanding the characteristics of past dry-wet changes in the Taibai Mountain area is of great importance for the study of the climate change mechanism and the sustainable use of water resources in the future. This study reconstructed the standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*) value of the spring of 1852 - 2016 (3 - 5 months) based on the data retrieved from the *Larix chinensis* tree-ring widths in the Taibai Mountain area in the Qinling Mountains and the meteorological data (1959 - 2016) obtained from the nearby Baoji and Meixian meteorological stations. The results indicated as follows: (1) the radial growth of *Larix chinensis* in Taibai Mountain is mainly limited by spring climate change; as it exhibited the highest correlation with spring *SPEI* value, reaching - 0.72 ($P < 0.01$), and the reconstruction captured 51.8% (51.0% after adjusting the degree of freedom) of the *SPEI* variance. (2) Among the past 165 years, 29 years were wet years and 23 years were drought years, accounting for 17.58% and 13.94%, respectively, of the total. The extreme drought years were identified to be 1892, 1929, 1945, and 2006 CE and the extreme wet years were 1881, 1921, and 1990 CE. The driest and wettest years were 1892 CE (- 1.73) and 1881 CE (1.53), respectively. (3) The reconstructed *SPEI* values was found to be in agreement with the reconstruction results of the wet and dry changes in the surrounding areas and with the historical records of the disasters. The dry and wet changes in Taibai Mountain can accurately characterize the dry and wet changes in large areas and show cyclical changes of 8.4, 3.8, 3.1, and 2.5 years. The *SPEI* in the Taibai Mountain area was found to be positively correlated with the western Pacific Sea surface temperatures and negatively correlation with those of the eastern Pacific. The dry and wet changes were found to be related to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) activities.

Key words: the Taibai Mountain; *Larix chinensis*; tree-rings width; spring; *SPEI*